

## Numerical Study of Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) on Commercial Ships by Using ANSYS FLUENT

Dr. Mouna Esper\*  
Dr. Jaedaa Abdulhamid\*\*  
Rose Saleh\*\*\*

(Received 27 / 5 / 2023. Accepted 20 / 8 / 2023)

### □ ABSTRACT □

Hydrogen Fuel Cell (HFC) is a clean technology that generates electricity through an electrochemical reaction that converts the chemical energy of hydrogen into electricity through an oxidation reaction of hydrogen over a proper catalyst and produces water as a by-product. Hydrogen Fuel Cell has high efficiency and zero emissions which make it a good choice to use on commercial ships in order to comply with international maritime regulations in terms of reduction of GHG emissions. In this paper, a Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) installed onboard a chemical tanker is researched. A numerical investigation of its performance is conducted using Ansys Fluent. The CFD value of generated power shows a good agreement with the experimental value of 98.2%. The obtained results show a good temperature distribution over the cell and a regular reduction of hydrogen and oxygen density along both channels of anode and cathode which resemble the theoretical aspects of hydrogen fuel cell working principles and make a basis for researching its economic feasibility onboard commercial ships.

**Keywords:** hydrogen fuel cell, PEMFC, Ansys Fluent, CFD, chemical tanker ship.

---

\* Professor, Department of Marine Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria, Email: dr.mounasafyesber@tishreen.edu.sy

\*\* Assistant Professor, Department of Marine Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria, Email: jaedaa.abdulhamid@tishreen.edu.sy

\*\*\* Master Student, Department of Marine Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria, Email: Rosesaleh27@gmail.com

## دراسة رقمية لخلايا الوقود الهيدروجينية (PEMFC) المستخدمة على السفن التجارية باستخدام ANSYS FLUENT

د. منى اسبر \*

د. جداء عبد الحميد \*\*

روز صالح \*\*\*

(تاريخ الإيداع 27 / 5 / 2023. قُبِلَ للنشر في 20 / 8 / 2023)

### □ ملخص □

تعتبر خلايا الوقود الهيدروجينية تقنية نظيفة لتوليد الكهرباء من خلال تفاعل كهروكيميائي يتم فيه تحويل الطاقة الكيميائية للهيدروجين إلى كهرباء من خلال تفاعل أكسدة الهيدروجين والأكسجين بوجود محفز مناسب وينتج الماء كمنتج ثانوي. تتمتع خلايا الوقود الهيدروجينية بكفاءة عالية وانبعثات صفرية. مما يجعل من الجيد استخدامها على السفن التجارية بما يحقق الامتثال للتشريعات البحرية الدولية من حيث تخفيف انبعاثات غازات الدفيئة. في هذه الورقة البحثية تمت دراسة خلية وقود هيدروجينية من نوع غشاء التبادل البروتوني PEMFC (Proton exchange membrane fuel cell) على ناقله كيميائية. تمت دراسة أداء الخلية رقمياً باستخدام برنامج ANSYS FLUENT. أظهرت القيمة الرقمية للاستطاعة المولدة توافقاً مع القيمة التجريبية بنسبة 98.2%. بينت النتائج التي تم الحصول عليها توزيع جيد لدرجة الحرارة في الخلية بالإضافة أيضاً لانخفاض منتظم في كثافة الهيدروجين والأكسجين على طول قناتي الأنود والكاثود بما يتفق مع الأسس النظرية لمبدأ عمل خلية الوقود الهيدروجينية وبما يشكل أساساً لدراسة الجدوى الاقتصادية لاستخدامها على السفن التجارية.

**الكلمات المفتاحية:** خلية وقود هيدروجينية، PEMFC، Ansys Fluent، ميكانيك الموائع الحسابية، ناقله مواد كيميائية.

\* استاذ-قسم الهندسة البحرية- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.

\*\* مدرس مساعد-قسم الهندسة البحرية- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.

\*\*\* طالبة ماجستير-قسم الهندسة البحرية- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.

## مقدمة:

يشكل النقل البحري الجزء الأكثر أهمية من قطاع النقل بنسبة أكثر من 90% من التجارة العالمية فهو يتميز بقدرته الاستيعابية الكبيرة وتكلفة تشغيل منخفضة مقارنة بوسائل النقل الأخرى، لكن مع هذه المزايا هناك كميات هائلة من أكاسيد النيتروجين  $NO_x$  وأكاسيد الكبريت  $SO_x$  والجسيمات وغيرها التي تنتج عن عمل هذه المحركات والتي تسبب اضراراً بيئية خطيرة، إذ تصدر محركات الديزل البحرية ما يقارب 20 مليون طن من أكاسيد النيتروجين و 10 مليون طن أكاسيد الكبريت ومليون طن من الجسيمات كل عام بالإضافة إلى القلق المتزايد بشأن غازات الاحتباس الحراري GHG المنبعثة من محركات السفن . تبلغ نسبة الأكاسيد المنبعثة من السفن (أكاسيد النيتروجين 15%، أكاسيد الكبريت، 4-9% وأكاسيد الكربون 2.7%) من إجمالي التلوث العالمي [1].

لمعالجة هذه المشكلة وضعت المنظمة البحرية الدولية IMO لوائح منع تلوث الهواء (MARPOL 73/78 Annex VI) و أدخلت الحكومات معايير لانبعاثات السفن حيث قام الاتحاد الأوروبي والولايات المتحدة الاميركية بتحديث ملفات معايير لانبعاثات السفن النهرية الداخلية، و أصدرت الصين للمرة الأولى المعيار الوطني للتحكم في انبعاثات محركات السفن. و اعتباراً من 1 اذار 2020 فُرض حظر نقل على زيوت الديزل التي تحتوي أكثر من 0.5% كبريت لجميع أنواع السفن التي لا تحتوي على نظام تنقية غازات العادم.

من ناحية أخرى هناك طلب متزايد على الطاقة بسبب زيادة النشاط التجاري البحري بالإضافة إلى صعوبة العمل مع هذه الحدود ونظراً لعدم تجدد الوقود الأحفوري فقد أصبح من الضروري البحث عن وقود بديل لتلبية متطلبات الشحن لذلك تحتاج إلى طاقة نظيفة فعالة بديلة او رديفة لمحركات الاحتراق الداخلي.

يعتبر استخدام مصادر الطاقات المتجددة خياراً جيداً مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح لكن المشكلة في هذه الأنواع أنها لا تتوفر بشكل دائم ولا تملك نفس المعدلات من الطاقة بل إنها تتغير زمنياً ومكانياً، لكن عند الحديث عن مصدر طاقة متجدد ومتوفر بشكل دائم فالهيدروجين هو الوقود المستقبلي الأكثر توافراً وانتشاراً وبدون انبعاثات ضارة بيئياً لكنه لا يوجد بشكل حر في الطبيعة بل يوجد متحداً مع عناصر اخرى وللحصول عليه يجب استخلاصه من مركباته، تتم الاستفادة من الطاقة الكيميائية الموجودة في الهيدروجين بواسطة خلايا الوقود، يمكن أن تلعب خلايا الوقود دوراً رئيسياً في تحويل الطاقة الكيميائية للوقود إلى طاقة كهربائية مع انبعاثات ضئيلة او معدومة بالإضافة إلى أن الأجزاء الميكانيكية أقل ضجيجاً وعلاوةً على ذلك فإنها تتميز بالمرونة حيث أنها تعطي فرصة لمالكي السفن لتقليل نسبة الأكاسيد المنبعثة اثناء الإبحار خصوصاً في مناطق ECA<sub>s</sub>.

وفقاً للمفوضية الأوروبية (EC)، يبلغ محتوى الطاقة للهيدروجين 120MJ/Kg، وهو أعلى بثلاث مرات تقريباً من محتوى الطاقة لأنواع الوقود الأخرى، بالرغم من مزايا الهيدروجين كوقود بحري إلا أنه يواجه بعض العقبات الكبيرة مثل الافتقار إلى البنى التحتية و التكلفة العالية [2].

في سبيل ذلك، تم في هذا البحث استخدام تقنية ميكانيك الموائع الحسابية CFD لدراسة وحساب الاستطاعة المتولدة عن خلية وقود عاملة على السفن التجارية من نوع PEM وتقود هذه الدراسة إلى معرفة امكانية وشروط تشغيل خلية الوقود على السفن التجارية لاسيما في مناطق التحكم بالانبعاثات ECA<sub>s</sub>.

## الدراسات المرجعية:

قام Puthran, 2011 [3] بتقديم نموذج حسابي ثلاثي الأبعاد لخلية وقود من نوع الأوكسيد الصلب SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) وتم دراسة تأثير التغيرات في درجة الحرارة وسماكة المنحل بالكهرباء على أداء الخلية إذ

تم باستخدام ANSYS FLUENT تجريب الهيدروجين كوقود وتحليل أداء النموذج من خلال تغيير سماكة المنحل من (2-100) ميكرومتر .

كما استخدم Klebanoff, 2017 [4] تحليل Well-To-Waves(WTW) لإجراء مقارنة نظرية لانبعاثات الغازات الدفينة بين العبارة SF-BREEZE عالية السرعة تعمل بخلية وقود من نوع غشاء التبادل البروتوني PEM بقدرة إجمالية مركبة 4920Kw وعبارة VALLEJO تعمل بمحركات ديزل تقليدي يعطي طاقة إجمالية 3400kw حيث بينت النتائج أنه باستخدام الهيدروجين السائل في عبارة SF-BREEZE كانت الانبعاثات أقل بنسبة 75.8% مقارنة بمحرك VALLEJO الذي يعمل بوقود الديزل.

درس كل من Mahyari and Afrouzi and Shams,2017 [5] نموذج ثلاثي الأبعاد لخلية وقود PEMFC (Proton exchange membrane fuel cell) وتم حل معادلات حفظ الكتلة والزخم وانتقال الأنواع والطاقة والشحنة وبينت النتائج أن الماء يتراكم مع مرور الوقت في منطقة الأنود مما يقلل كمية الهيدروجين الداخلة إلى الخلية بالتالي انخفاض فعالية الخلية ووجد أن معدل التراكم مرتبط بشكل كبير بالتيار المستمد من الخلية.

قدم كلا من Awan and Saleem and Basit,2018 [6] دراسة لمحاكاة تأثير الضغط ودرجة الحرارة على أداء خلية الوقود حيث تم تجريب تشغيل خلية الوقود من نوع PEM عند 323 كلفن و 1 atm في ظروف متساوية الحرارة و في ظروف غير متساوية الحرارة عند 353 كلفن و 2 atm وتظهر النتائج أن كثافة التيار تزداد مع زيادة ضغط التشغيل وتتناقص عند زيادة درجة الحرارة .

كما قام Inal and Dere and Deniz,2020 [7] بعرض أساليب التخزين على السفن والعقبات أمام تخزينها و قدموا تفصيلاً للبنية التحتية للتزويد والتخزين والتوافر العالمي لوقود الهيدروجين.

قام Chiche and Andruetto,2021 [8] بدراسة وتحليل متطلبات تخزين الطاقة وتقييم الاستدامة لقارب إنقاذ خفيف وسريع يعمل في بحيرة باركين السويدية مزود بنظام دفع هجين بين خلايا الوقود وبطارية بهدف تحسين الوزن وبينت النتائج أنه إذا تم تخزين الهيدروجين بكفاءة فإن وزن النظام الهجين سيكون أقل بكثير من وزن نظام البطارية لوحدتها ويمكن أن ينافس محرك احتراق داخلي من حيث الكلفة والانبعاثات.

درس Rattazzi,2021 [9] نظام قائم على خلية وقود من نوع PEMFC لعبارة نقل ركاب تتسع ل 200 شخص باستخدام تحليل اقتصادي حراري يعتمد على الوقت لتحديد ظروف التشغيل المثلى وتقليل التكاليف.

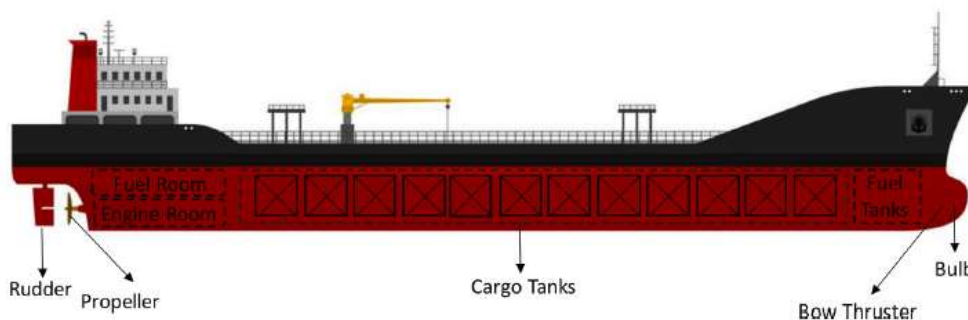
### أهمية البحث وأهدافه:

نلاحظ أن الدراسات المرجعية السابقة لم تكن كافية وشاملة لخلايا الوقود الهيدروجينية ذات الأبعاد الكبيرة والمستخدمه بشكل خاص على السفن التجارية كما أن النماذج الرقمية قامت بدراسة تغيرات درجات الحرارة والضغط وسماكة المنحل على أداء خلايا وقود هيدروجينية ذات أبعاد و استطاعات صغيرة جداً مقارنة بأنواع الخلايا المستخدمة على السفن التجارية وبعض هذه الدراسات اكتفت بالدراسة النظرية فقط، وبسبب عدم وجود مراجع كافية من الناحية الرقمية تطلب إنجاز هذا العمل جهداً مضاعفاً من أجل الحصول على قيم و أبعاد حقيقية لخلية الوقود وتجهيز بيئة العمل الافتراضية وتوليد الموديل الرياضي وضبط المعادلات الحاكمة بالشكل الصحيح لخلية وقود غشاء التبادل البروتوني PEMFC العاملة على ناقله كيميائية، لذلك كانت أهم أهداف البحث كالتالي:

- تقديم موديل رياضي تصميمي متكامل لخلية وقود هيدروجينية من نوع PEMFC لسفينة تجارية (ناقلة مواد كيميائية) باستخدام برنامج ANSYS Fluent
- ضبط المعادلات الرياضية الحاكمة للجريان و للتفاعلات الكهروكيميائية
- تحليل أداء النموذج المدروس ودراسة تغيرات درجات الحرارة وتدرجات الكسر الكتلي للمواد المتفاعلة والمواد الناتجة.
- التأكد من فعالية هذا النوع من الخلايا للعمل على السفن التجارية .

### طرائق البحث ومواده:

تم دراسة خلية الوقود PEMFC على سفينة ناقلة مواد كيميائية الموضحة في الشكل (1) للرحلات متوسطة المسافة والتي تسير بسرعة متوسطة تبلغ 11.8 عقدة مجهزة بمحرك رئيسي من نوع Wartsila31 ومحرك مساعد Wartsila20 وهي محركات رباعية الاشواط غير قابلة للانعكاس ذات شاحن توربيني ومبرد بيني ويحتوي المحرك الرئيسي 14 اسطوانة وإزاحة المكبس 31 ليتر وذو استطاعة 8.3MW و محركات مساعدة ذات ثمان اسطوانات و إزاحة المكبس 20 ليتر لكل اسطوانة ويخرج قدرة 2.8MW.



الشكل (1): شكل تخطيطي لناقلة المواد الكيميائية [9].

مواصفات السفينة مبينة في الجدول (1)

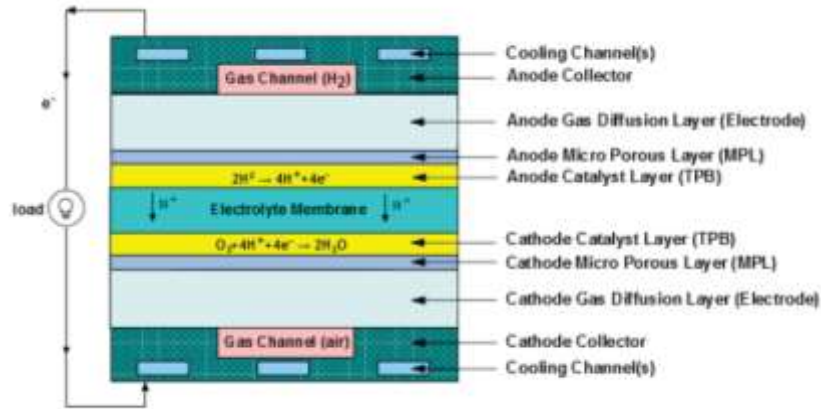
الجدول (1): المواصفات الفنية لناقلة المدروسة [9].

IMO (Code)	9797723
Gross Tonnage (tons)	29,256.0
DWT(tons)	49,999.0
Length Overall(m)	103.0
Engine Room Volume(m <sup>3</sup> )	3,276.0
Fuel Room Volume (m <sup>3</sup> )	1,646.0
Year Built	2017

تم استخدام CFD لحساب التدفق بأدق تفاصيله وتوفير الجهد والتكلفة في إجراء الحسابات حيث تم استخدام برنامج ANSYS Fluent. تم إدراج الموديل الكهروكيميائي لخلية الوقود من نوع PEMFC من خلال الأمر البرمجي التالي (9 → add-on-module → models → define). يملك برنامج ال ANSYS الكثير من الميزات التي تمكن من حل أي مشكلة في الأوساط المستمرة وخصوصاً في حالتنا هذه التي تجمع الكهرباء و الكيمياء معاً بالإضافة إلى ميكانيك الموائع بأنواعها المختلفة (النيوتونية، غير النيوتونية، القابلة للانضغاط، غير القابلة للانضغاط).

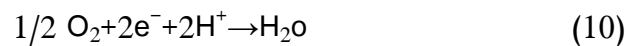
### نظرية خلية الوقود:

خلية الوقود هي جهاز تحويل الطاقة من كيميائية إلى كهربائية [10] حيث تم دراسة خلية الوقود ذات غشاء التبادل البروتوني بسبب كفاءتها العالية وعمرها التشغيلي الطويل ومرونتها الكبيرة قلة متطلباتها المادية مما يجعل البحث والتطوير يركز عليها، مبدأ عملها يقوم على تدفق الهيدروجين في المصعد وانتشاره خلال طبقة الفصل الغازي المسامية Gas Diffusion Layer والطبقة المسامية الرقيقة Micro Porous layer، بعدها يتأين الهيدروجين في طبقة المحفز Catalyst Layer فينتشر أيونات الهيدروجين والالكترونات، تتدفق أيونات الهيدروجين من خلال غشاء الفصل البوليميري Membrane إلى جانب المهبط، أما الالكترونات فتتدفق عبر GDL إلى مجمع التيار ثم إلى الحمل الكهربائي الموصول، في ذات الوقت يتدفق الأوكسجين (أو الهواء) إلى خلية الوقود على جانب المهبط ومن ثم يتدفق الأوكسجين إلى طبقة الفصل الغازي Gas Diffusion Layer في جانب المهبط عبر الطبقة المسامية الرقيقة Micro Porous layer للوصول إلى الطبقة المحفزة فيها تتحد الإلكترونات وأيونات الهيدروجين والأوكسجين ويتشكل الماء كما هو مبين في الشكل (2)



الشكل (2): التفاعلات الكهروكيميائية داخل خلية الوقود الهيدروجينية [11].

في نموذج خلية الوقود PEMFC يتم حل حقلين كهربائيين، الأول في غشاء الفصل Membrane وطبقة المحفز Catalyst Layer والأخرى في الطبقة المحفزة والطبقة المسامية ومجمعات التيار ويتم حساب معدلات التفاعلات الكهروكيميائية في طبقات المحفز لكل من المصعد والمهبط بناءً على جهد الخلية ويتم أيضاً حساب كثافة التيار. تعد خلية الوقود PEMFC تقنية مفضلة كونها نظيفة وتعمل عند درجات حرارة منخفضة أقل من 100 درجة مئوية وتسمح بالتحكم بخرج الطاقة ويمكن أن تبدأ العمل بسرعة نسبية مقارنة ببقية الأنواع الأخرى و تحدث فيها التفاعلات كما يلي:



تنتقل الإلكترونات في دارة الأنود عبر دارة خارجية إلى المهبط، أما البروتونات  $\text{H}^+$  تنتقل عبر غشاء الفصل Membrane من المصعد إلى المهبط وبذلك تتشكل دارة كهربائية.

### الموديل الكهروكيميائي:

في الكيمياء الكهربائية يتم حساب معدلات التفاعلات في المهبط والمصعد، والقوة الدافعة وراء هذه التفاعلات هي الكمون السطحي الزائد أي الفرق بين الجهد الطوري للمواد الصلبة والجهد الطوري للغشاء، لذلك يتم حل معادلتين الأولى لانتقال الإلكترونات من خلال المواد الموصلة الصلبة ويتم حلها في طبقة المحفز والشبكات الصلبة للوسائط المسامية ومجمع التيار والمعادلة الأخرى تمثل النقل البروتوني  $H^+$  ويتم حلها في طبقة المحفز وغشاء الفصل والمعادلتان هما :

$$\nabla \cdot (\sigma_{sol} + \nabla \phi_{sol}) + R_{sol} = 0 \quad (11)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_{mem} + \nabla \phi_{mem}) + R_{mem} = 0 \quad (12)$$

حيث:

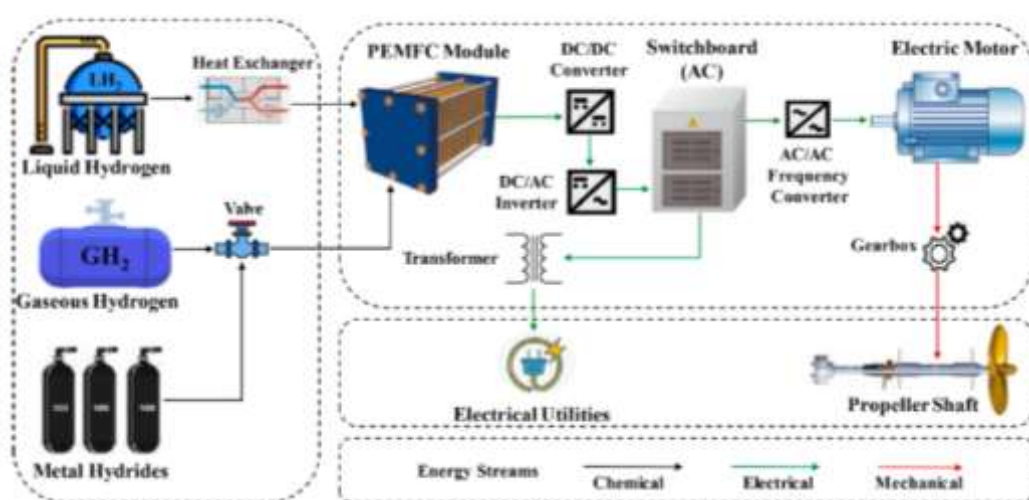
$\nabla$  التابع دلنا يمثل التغير الجزئي

$\sigma$  الموصلية الكهربائية (1/ohm-m)

$\phi$  الجهد الكهربائي (volt)

$R$  تيار النقل الحجمي ( $A/m^3$ )

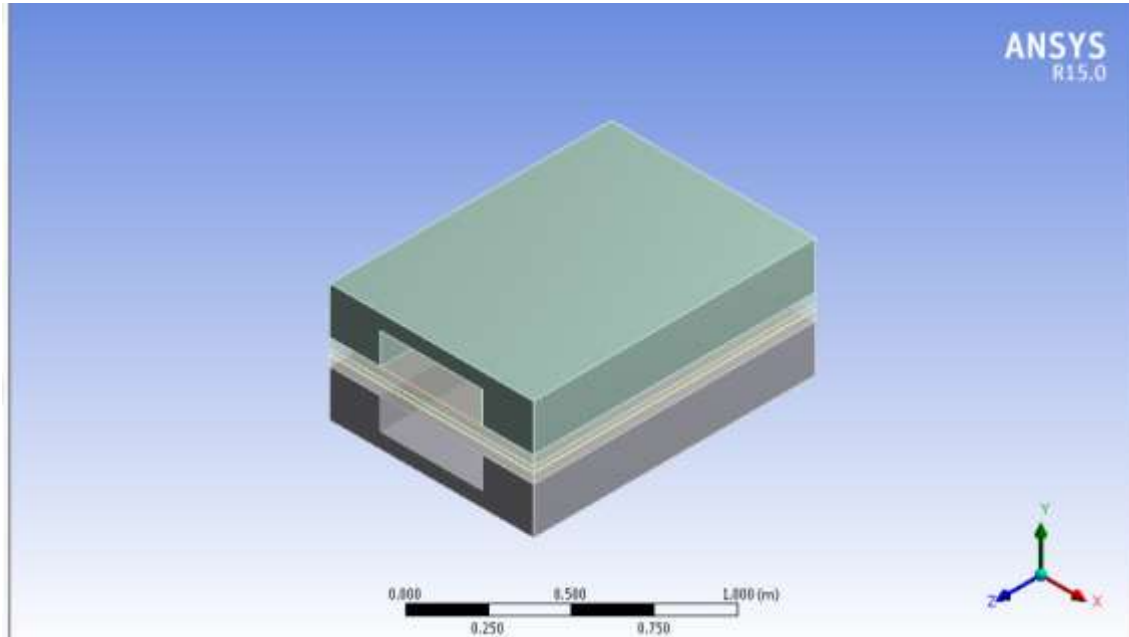
تحل مجموعة نظام خلية الوقود PEMFC المعتمدة على  $H_2$  محل محرك الاحتراق الداخلي التقليدي حيث تزود بإحدى أشكال الهيدروجين النقي المخزن على السفن ويوضح الشكل (3) مخطط نظام نقل الحركة القائم على خلية الوقود PEMFC حيث تولد خلية الوقود تياراً مستمراً يتم إدخاله إلى محول DC/DC ثم إلى محول DC/AC تقوم لوحة التيار المتناوب بتوزيع الطاقة الكهربائية إلى المستهلكات حيث يتم استخدام محول اعتماداً على نوع الحمولة (جميع الأنظمة تتطلب محول باستثناء المحرك الكهربائي) حيث يتم تنظيم الطاقة الكهربائية المخصصة للمحرك الكهربائي باستخدام محول التردد بحيث يمكن استخدام مجموعة كاملة من السرعات ويتم توصيل المحرك الكهربائي بمحور الرفاص بواسطة علبة السرعة كما هو مبين في الشكل (3)



الشكل (3): شكل تخطيطي يبين آلية عمل خلية الوقود وتوليد الاستطاعة اللازمة للدفع [9].

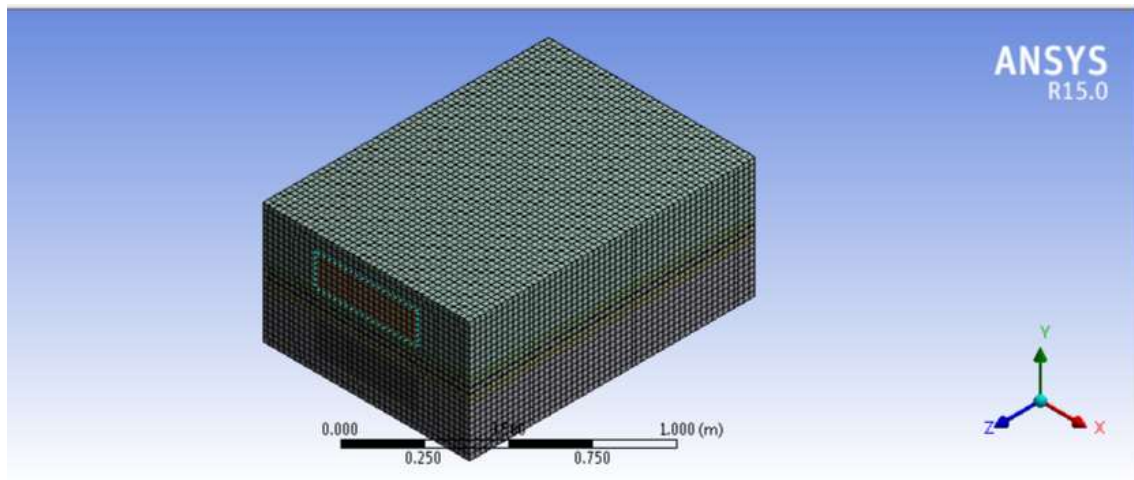
### بناء الشكل الهندسي:

يبين الشكل (4) النموذج الهندسي للخلية المدروسة، تم بناء الشكل الهندسي لخلية الوقود باستخدام أداة الرسم الهندسي Design Modeller، كما تم الاعتماد على نموذج ثلاثي الأبعاد لخلية الوقود تحتوي على مدخلين ومخرجين أحدهما للوقود و الآخر للهواء.



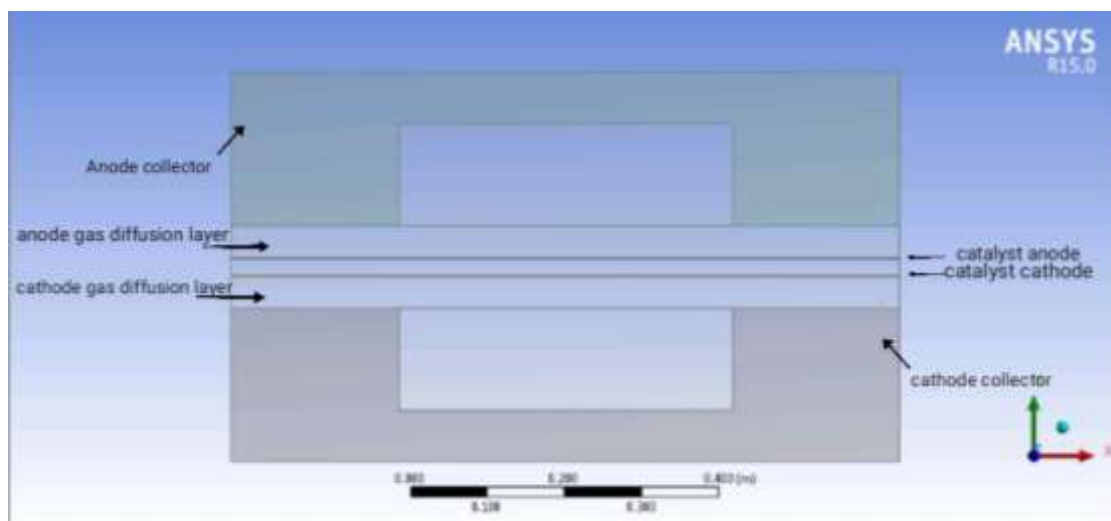
الشكل (4): النموذج الهندسي المعتمد في الدراسة.

تم بناء الشبكة باستخدام برنامج Ansys Meshing حيث سمح الشكل الهندسي للحالة المدروسة باستخدام شبكة ديكارتية Cartesian Grid ذات 56160 عقدة و 61675 عنصر، بلغ الحد الأدنى من الجودة المتعامدة 0.998 و أقصى انحراف تقويمي بلغ 1.193 ويوضح الشكل (5) الشكل الهندسي بعد التقسيم كما تم تعريف الأجزاء المكونة للنموذج، حيث تم تسميتها كما هو مبين في الشكل (6) والشكل (7)

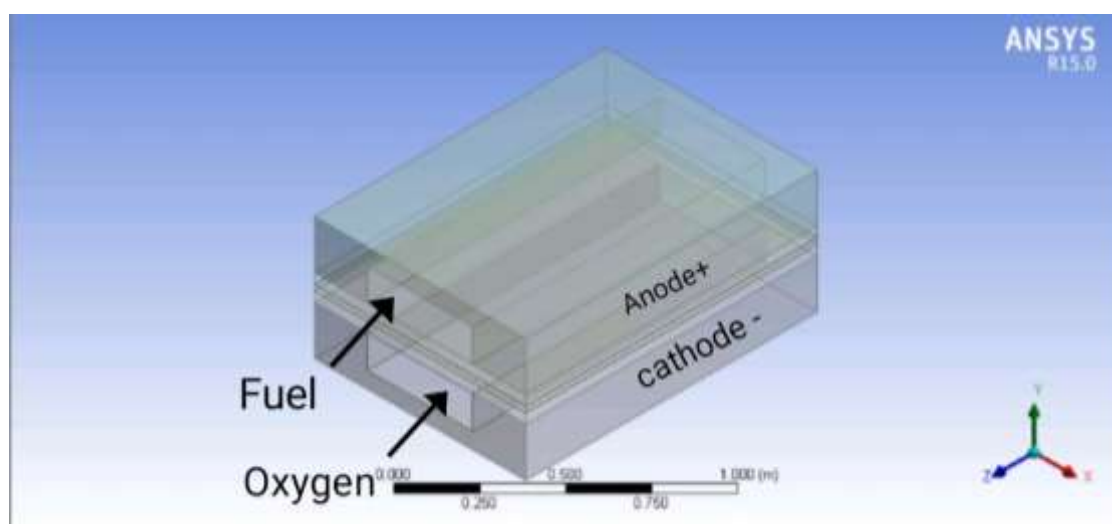


الشكل (5): تقسيم المجال الحسابي إلى خلايا صغيرة.





الشكل (6): الأجزاء المكونة للنموذج المدروس.



الشكل (7): الأجزاء المكونة للنموذج المدروس.

كما يوضح الجدول (2) الشروط الحدية التي تم استخدامها، حيث تم إدراجها بدلالة التدفق الكتلي لكل من الأوكسجين و الهيدروجين عند المدخلين وهنا يجب مراعاة أن تكون نسبة الهيدروجين أكبر من نسبة الأوكسجين وذلك لإتمام عملية التآين و تشكيل المياه حيث أن كل جزيء من الهيدروجين يحتاج ذرة أوكسجين واحدة لتشكيل الماء كما تم ذكره سابقاً في المعادلة (10)، وهنا يجب التنويه إلى ضرورة إدخال الماء بنسبة صغيرة (0.2 في المصعد و0.1 في المهبط) وذلك لمراعاة عامل الرطوبة في كلا القطبين للمحافظة على الخصائص المسامية لهما، أما بالنسبة للمخرجين فإنه تم بدلالة الضغط وتم تعيين درجة حرارة واحدة لجميع الأجزاء، كما يجب تحديد قيمة الجهد الكهربائي للأجزاء الصلبة (المصعد والمهبط) بحيث يكون جهد المصعد صفر وجهد المهبط قيمة موجبة وذلك من أجل خلق فرق جهد بينهما لتوليد تيار كهربائي.

الجدول (2): الشروط الحدية التي تم إدراجها.

Boundary conditions	Location		values	Units
Mass flow inlet	Inlet anode	Mass flow inlet	$4e^{-6}$	Kg/s
		H <sub>2</sub> mass fraction	0.8	-
		Water mass fraction	0.2	-
	Inlet cathode	Mass flow inlet	$4e^{-5}$	Kg/s
		O <sub>2</sub> mass fraction	0.2	-
		Water mass fraction	0.1	-
Pressure outlet	Outlet anode	Outlet gas pressure	0	Pa
	Outlet cathode	Outlet gas pressure	0	Pa
Wall	Terminal anode	Specified electric potential	0	V
	Terminal cathode	Specified electric potential	0.75	V
	All faces	Constant temperature	353	K

تم إجراء معايرة قيمة الاستطاعة للنموذج المدروس أظهرت النتائج أن المحسوبة عند قيمة الجهد الكهربائي 0.75 V وكثافة التيار  $26.2 \text{ A/Cm}^2$  رقمياً وأظهرت النتائج تطابقاً جيداً مع القيمة التجريبية بمقاربتها 98.2% وهذا ما يؤكد دقة CFD فيما يخص التفاعلات الكهروكيميائية. النتائج موضحة في الجدول (3):

الجدول (3): مقارنة بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية للاستطاعة المتولدة عن خلية الوقود الهيدروجينية.

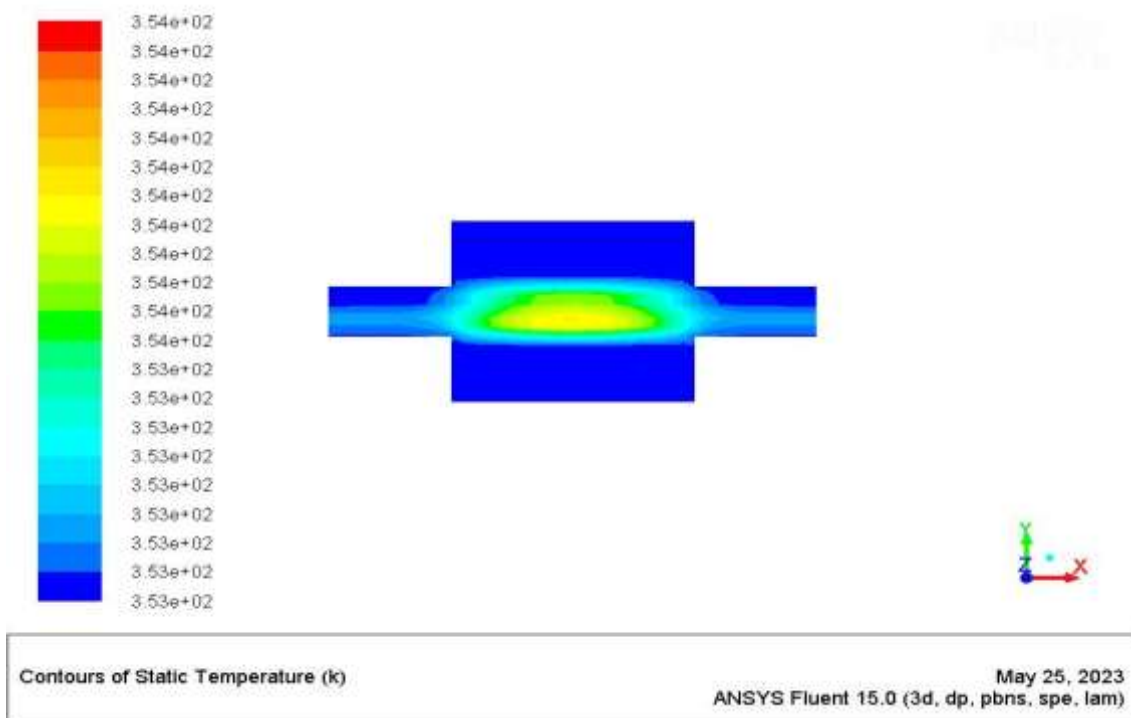
النموذج الرقمي	البيانات التجريبية	
الاستطاعة Kw	الاستطاعة Kw	النسبة المئوية للفرق بين الاستطاعتين %
98.2	100	1.8%

بالتالي فإن نظام توليد الحركة للسفينة ذات الاستطاعة 8.3MW يتكون من 83 خلية وقود ذات استطاعة 100KW لكل منها.

### النتائج والمناقشة:

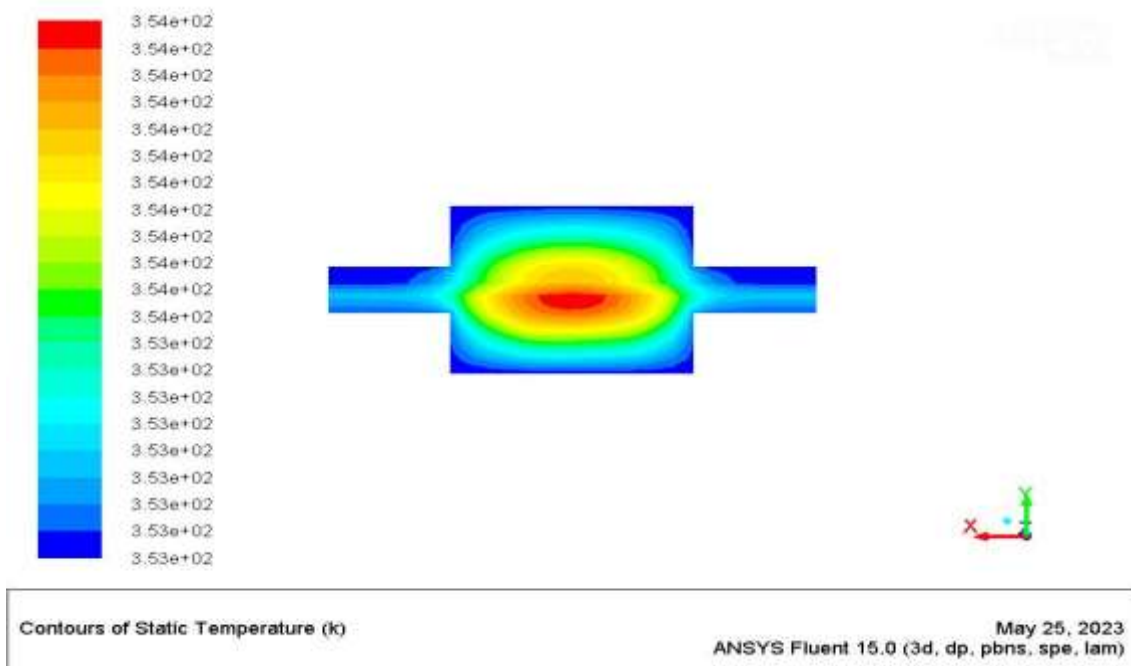
#### 1-تقييم درجة الحرارة:

يوضح الشكل (7) توزيع درجات الحرارة لخلية الوقود المدروسة عن المدخل 7-a وعند المخرج 7-b



الشكل (7-a): توزيع درجات الحرارة عند كلا المدخلين.

- بملاحظة تغيرات درجة الحرارة عند المدخلين نلاحظ أن الحرارة تكون بأعلى قيمة لها عند المركز 354 K بمساحة انتشار صغيرة وتتناقص درجة الحرارة باتجاه المحيط بشكل متدرج (من البرتقالي إلى الأصفر إلى الأزرق الفاتح) وهذا يدل على بداية حدوث عملية التأين لغاز الهيدروجين عند المصعد واتحاد جزيئات الأوكسجين في المهبط مع أيونات الهيدروجين لتشكيل الماء وهي عمليات يرافقها انتشار حرارة.

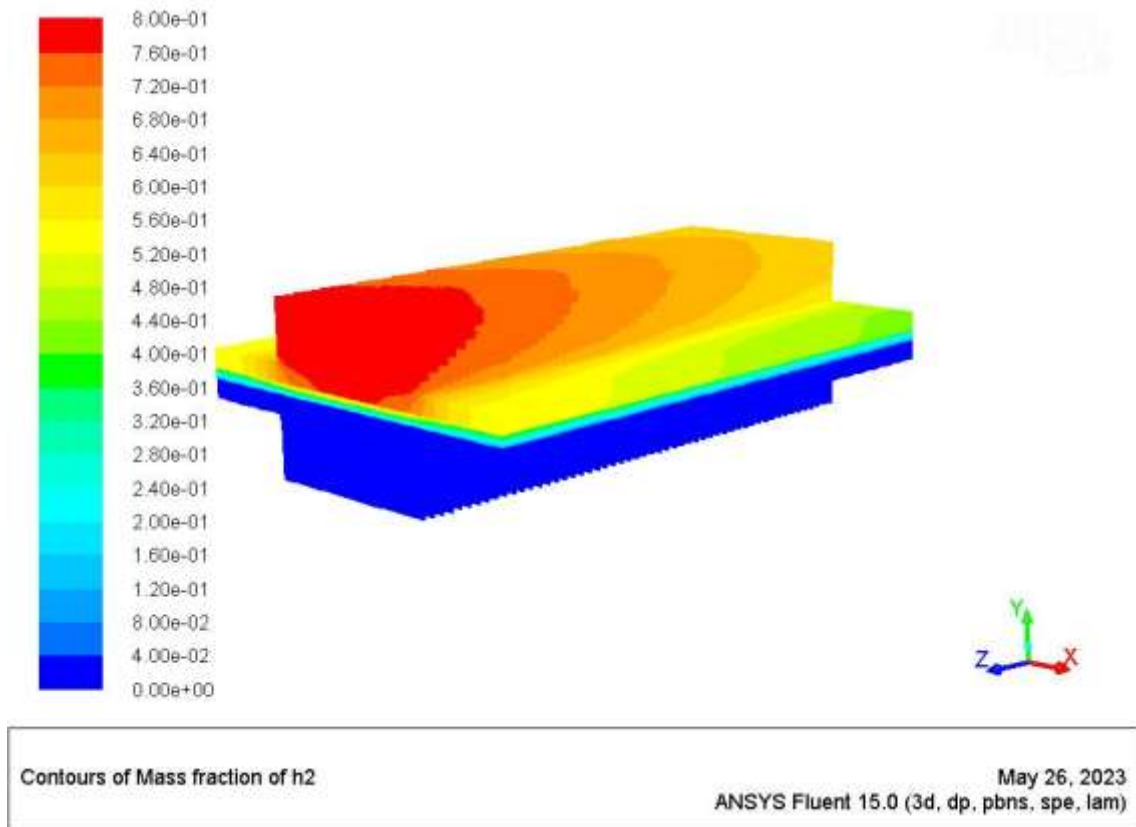


الشكل (7-b): توزيع درجات الحرارة عند كلا المخرجين.

- بملاحظة تغيرات درجة الحرارة عند المخرجين نلاحظ أن الحرارة تكون بأعلى قيمة لها عند المركز 354 K تتركز قيمتها الأعظمية بجانب المهبط بشكل أكبر وأكثر انتشاراً منه في جانب المصعد وتتناقص باتجاه المحيط بشكل متدرج (من البرتقالي إلى الأصفر إلى الأزرق الفاتح) وهذا نتيجة لتفاعلات التأين لغاز الهيدروجين عند المصعد واتحاد جزيئات الأوكسجين في المهبط مع أيونات الهيدروجين لتشكيل الماء وهي عمليات يرافقها انتشار حرارة وهذا يفسره تركيز اللون الاحمر عند جانب المهبط بشكل أكبر منه عند جانب المصعد.

## 2-تقييم الكسر الكتلي للهيدروجين $H_2$ :

يوضح الشكل (8) تغير الكسر الكتلي للهيدروجين على طول خلية الوقود.

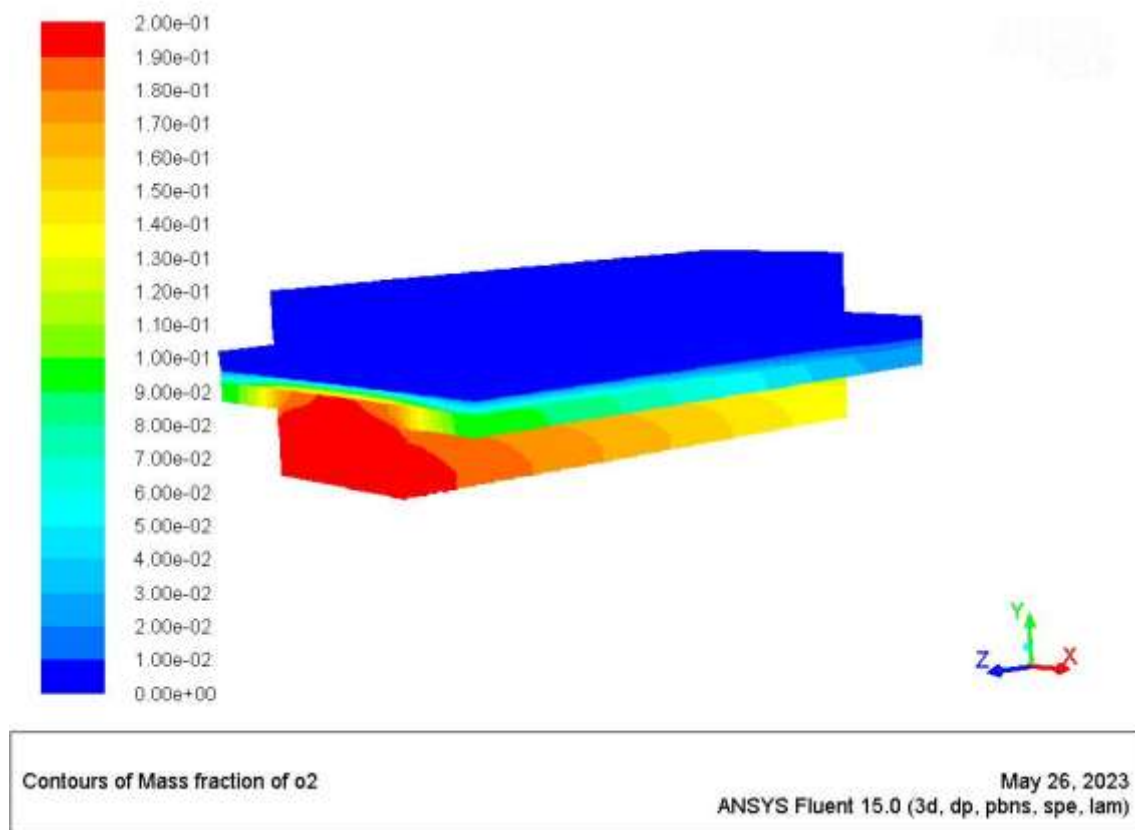


الشكل (8):التردد اللوني لتغير الكسر الكتلي للهيدروجين على طول خلية الوقود.

- يمكن من خلال التدرج اللوني ملاحظة أن الكسر الكتلي للهيدروجين عند المصعد يتناقص من 80% في المدخل إلى 60% عند المخرج عند درجة حرارة 353 K وجهد 0.75 V يعود هذا الفارق إلى المسامية التي تتميز بها طبقة الانتشار الغازي (gdl-a) حيث أن الهيدروجين ينفذ من خلال هذه الطبقة إلى طبقة المحفز anode catalyst layer ليتم فيها تأين غاز الهيدروجين وتحرير الإلكترونات  $e^-$  أما الغاز غير المتفاعل فإنه يخرج من مخرج المصعد ليتم اعادته إلى الخزانات، بالنسبة للمهبط فلا يمر به غاز الهيدروجين وهذا ما يفسره اللون الأزرق.

## 3- تقييم الكسر الكتلي للأوكسجين $O_2$ :

يوضح الشكل (9) تغير الكسر الكتلي للأوكسجين على طول خلية الوقود.

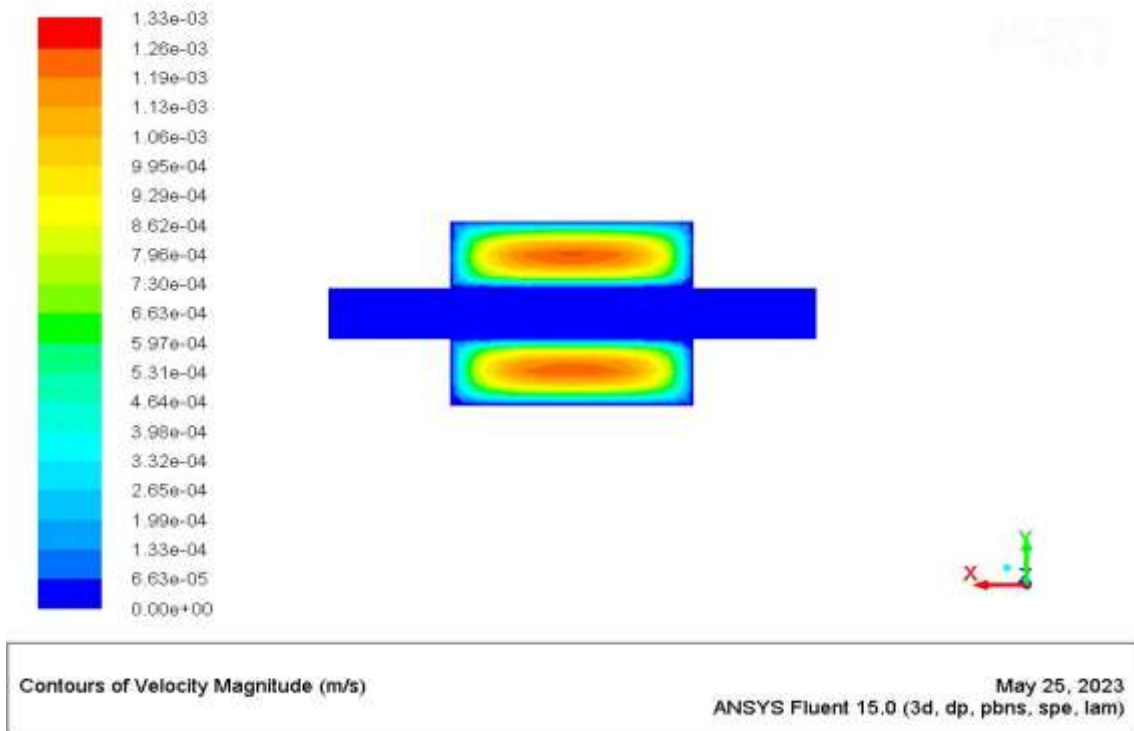


الشكل (9): التدرج اللوني لتغير الكسر الكتلي للأوكسجين على طول خلية الوقود.

- يمكن من خلال التدرج اللوني ملاحظة أن الكسر الكتلي للأوكسجين عند المهبط يتناقص من 20% في المدخل إلى 10% عند المخرج عند درجة حرارة 353 K وجهد 0.75 V ويعود هذا الفارق إلى المسامية التي تتميز بها طبقة الانتشار الغازي (gdl-c) حيث أن الأوكسجين ينفذ من خلال هذه الطبقة إلى طبقة المحفز cathode catalyst layer ليتم فيها التفاعل مع أيونات الهيدروجين  $H^+$  و الإلكترونات  $e^-$  لتشكيل الماء والحرارة أما الغاز غير المتفاعل فإنه يخرج من مخرج المهبط، بالنسبة للمصعد فلا يمر به غاز الأوكسجين وهذا ما يفسره اللون الأزرق.

#### 4- تقييم توزيعات السرعة:

يوضح الشكل (10) تدرجات السرعة في كل من مخرجي الخلية



الشكل (10): تدرجات السرعة في كل من مخرجي الخلية.

من خلال التدرج اللوني لتوزعات سرعة خروج كل من الهيدروجين غير المتفاعل من المصعد وسرعة خروج الماء الناتج عن التفاعل من المهبط يمكن ملاحظة أن السرعة تكون بقيمتها الأعظمية  $1.33e^{-3}$  m/s في مركز كل من المخرجين (اللون الأحمر) وتقل بالابتعاد عنه نحو المحيط في كل من المصعد والمهبط وذلك بسبب انخفاض الضغط في المركز وتزايدته نحو المحيط وهذا ما يفسر التدرج اللوني للقيم من الأصفر عند  $9.29e^{-4}$  حتى اللون الأزرق الفاتح عند  $3.32e^{-4}$  m/s.

### الاستنتاجات والتوصيات:

#### الاستنتاجات:

- من خلال هذه الدراسة يمكننا التأكيد على أهمية CFD في إجراء نمذجة للتفاعلات الكهروكيميائية ضمن خلايا الوقود من نوع PEMFC وإعطاء قيم مطابقة بشكل كبير للقيم المرجعية.
- خلايا الوقود الهيدروجينية من نوع PEMFC ذات انبعاثات صفرية وتشغيل هادئ وسريع مقارنة بمحركات الاحتراق الداخلي مما يجعلها منافسة له.
- عند استبدال نظام محركات الاحتراق الداخلي بنظام دفع قائم على خلايا الوقود الهيدروجينية تتوفر حجوم كبيرة في غرفة المحركات وبالتالي كتلة أقل، بسبب صغر حجم خلايا الوقود مقارنة بالمحرك الرئيسي الذي يتطلب عديد من الدارات والتجهيزات والمعدات التي تشغل حجماً ووزناً كبيرين يمكن الاستفادة منهما لتخزين البضائع.

#### التوصيات:

- يوصى باستخدام ديناميك الموائع الحسابية في عمليات التصنيع لخلايا الوقود بحيث يتم نمذجتها ومحاكاتها قبل الشروع في عملية التصنيع وذلك لمعرفة المشاكل والعيوب التي يمكن أن تواجهها، حيث أن التجارب المعملية تعتبر

مكلفة وبطيئة بالرغم من أنها قد تكون أكثر دقة، كما يوصى بأن تستخدم المحاكاة في التطبيقات التي يكون فيها خطورة علي حياة الانسان.

- يوصى بزيادة استخدام خلايا الوقود بشكل مستقل أو بشكل هجين مع محركات الاحتراق الداخلي على السفن التجارية وعدم اقتصارها على القليل منها والسفن قصيرة الرحلات وذلك لتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري وتقليل نسب الأوكسيد الناتجة عنها.
- يوصى باستخدام خلايا وقود غشاء التبادل البروتوني PEMFC من الخلايا بشكل مستقل لوحدها في سفن الركاب ذات الرحلات القصيرة بسبب سهولة التزود بالوقود الهيدروجيني من الموانئ العاملة بينها والغواصات لكونها هادئة التشغيل لا تصدر أي ضجيج وذات انبعاثات صفرية .

## References:

- [1]JOSE,J.,DE-TROYA.,CARLOS,A.,FERNANDEZ-GARRIDO,C., Carral,L.*Analysing the possibilities of using fuel cells in ships*. International Journal Of Hydrogen Energy, 2015,1-14.
- [2]Elsiad,K.,SAYED,E,T.,ABDELKAREEM,M,A.,MAHMOUD,M,S.,RAMADAN,M,OL ABI,A,G.,2020b.*Anvironmental impact of emerging desalination technologies: apreliminary evaluation*. Eng.8,104099.<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104099>
- [3] PUTHRAN,S.L. *3-dimensional computational fluid dynamics modeling of solid oxide fuel cell using different fuels*, Missouri S&T Library,2011,84.
- [4] KLEBANOFF, L.E. , PRATT, J.W., LEFFERS ,C.M. , SONERHLOM, K.T., ESCHER,T , BUGARD, J. *Comparison of the greenhouse gas and criteria pollutant emissions from the SF-BREEZE high-speed fuel-cell ferry with a diesel ferry*. *Transp Res Part D Transp Environ*, 2017; 5:250–68.
- [5] MAHAYARI,H.,AFROUZI,M,S., SHAMS,M. *Three-dimensional transient multiphase flow simulation in a dead end anode polymer electrolyte fuel cell*, Journal of molecular liquids, 2017, 225, 391-405.
- [6] AWAN,A.,SALEEM,M., BASIT,A. *Simulation of Proton Exchange Membrane Fuel Cell by using ANSYS Fluent*, IOP Conf. Ser, Mater. Sci. Eng, 414, 2018, 1-10.
- [7] INAL,O,B.,DENIZ ,C. *Assessment of fuel cell types for ships: Based on multi-criteria decision analysis*. Journal of Cleaner Production,2020,265,121734.
- [8] CHICHE, A., ANDRUETTO, C., LAGERGREN, C., LINDBERGH,G., STENIUS, I., PERETTI, L. *Feasibility and impact of a Swedish fuel cell-powered rescue boat*. *Ocean Eng*, 2021,234,109259.
- [9] DI MICCO,S.,MASTROPASQUA,V.,CIGOLOTTI,M.,BROUWER,J.*A framework for the replacement analysis of a hydrogen-based polymer electrolyte membrane fuel cell technology on board ships: A step towards decarbonization in the maritime sector*. *Energy Convers.Manag.*,vol.267,2022,115893.
- [10] RATTAZZI, D., RIVAROLO, M., MASSARDO ,A,F., DESIDERI, U., FERRARI, L., YAN, J. *An innovative tool for the evaluation and comparison of different fuels and technologies onboard ships*. E3S Web Conf 2021,238:08001.
- [11] ANSYS. INC, ANSYS FLUENT 12.0 – Theory guide.2011.